

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Měření oteplení konstrukčních částí asynchronního motoru při
napájení ze sítě**

**Measurement of Temperature Rise of Selected Design Parts of
Asynchronous Motor Supplied from Power Network**

2017

Daniel Wierzgoň

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Daniel Wierzgoň**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Měření oteplení konstrukčních částí asynchronního motoru při napájení ze sítě**
Measurement of Temperature Rise of Selected Design Parts of Asynchronous Motor Supplied from Power Network

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor (konstrukční provedení as. motoru, problematika oteplení)
3. Proveďte měření oteplovací křivky vybraných částí as. motoru při napájení ze sítě
4. Vyhodnocení naměřených údajů
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení, 2008, Praha, BEN
- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

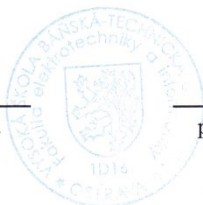
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, z kterých jsem čerpal.



podpis

V Ostravě dne 28.4.2017

Daniel Wierzoň

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a konzultace, které mi umožnily tuto bakalářskou práci dokončit.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá asynchronním strojem, přesněji jeho oteplovací charakteristikou. V teoretické části je popisována především konstrukce asynchronního stroje, jeho problematika rozběhu a možnosti regulace. Dále je popisována oteplovací charakteristika a grafická konstrukce ustáleného oteplení. Hlavní náplní praktické části je měření oteplovacích charakteristik asynchronního motoru při napájení ze sítě. Toto je prováděno pomocí čtyř teplotních čidel, která jsou umístěna na konstrukční části asynchronního motoru a zaznamenávají celou dobu, kdy je motor zatěžován jmenovitými hodnotami. Tyto hodnoty jsou pak zaznamenány jak graficky, tak i pomocí ukládání naměřených hodnot do textového editoru.

Klíčová slova

Asynchronní stroj, asynchronní motor, oteplovací charakteristika, konstrukce ustáleného oteplení, ustálená teplota.

Abstract

This bachelor work deals with an asynchronous machine, more precisely its warming characteristic. In a theoretical part there is described especially a construction of an asynchronous machine, its problems of starting-up and possibilities of a regulation. Then it is described a warming characteristic and a graphic construction of a steady-state warming. The main topic of a practical part is measuring of warming characteristics of the asynchronous engine during a power supply. It is maintained by the help of four temperature-sensitive elements which are placed on a construction part of the asynchronous machine and they record all time when the engine is loaded by nominal figures. These figures are then recorded graphically and also by the help of saving of measured data into a text editor.

Keywords

Asynchronous machine, asynchronous motor, warming characteristics, steady-state warming, steady temperature.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
Seznam použitých obrázků.....	10
Seznam použitých tabulek.....	11
Úvod.....	12
1. Asynchronní stroje	13
1.1 Použití	13
1.2 Konstrukce	13
1.2.1 Všeobecný popis konstrukce.....	13
1.2.2 Stator	14
1.2.3 Rotor.....	14
1.3 Princip činnosti asynchronního stroje	15
1.4 Náhradní schéma asynchronního stroje.....	15
1.5 Problematika rozběhu.....	16
1.5.1 Přepínáním Y/D.....	16
1.5.2 Změna odporu rotoru.....	17
1.5.3 Spouštění softstartérem	17
1.5.4 Spouštění měničem frekvence.....	17
1.6 Regulace otáček	17
1.6.1 Změna skluzu	17
1.6.2 Změna počtem pólů.....	17
1.6.3 Změnou frekvence.....	18
1.7. Moment asynchronního stroje.....	18
1.7.1 Momentová charakteristika asynchronního stroje.....	18
1.7.2 Popis momentové charakteristiky motoru a jejích částí	19
2. Oteplování asynchronního motoru	20
2.1 Oteplovací a ochlazovací charakteristika	20
2.2 Druhy přestupu tepla	20
2.3 Grafická konstrukce ustáleného oteplení	21
3. Tepelná ochrana strojů a její popis.....	22
3.1 Je důležité motor chránit?	22
3.2 Hlavní funkce ochrany	22
3.3 Rozběh motoru	22
3.4 Druhy ochran.....	23

4.Měření oteplovací charakteristiky	24
4.1.Schéma zapojení.....	24
4.2 Postup měření.....	26
4.3 Průběh celého měření	26
4.3.1 Popis čidel	26
4.3.2 Hodnoty jmenovitých hodnot v průběhu měření a jejich grafy.....	28
4.3.3 Ukázka fázového posuvu a jeho výpočet	31
4.3.4 Grafy oteplovacích charakteristik a konstrukce ustáleného oteplení	31
Závěr	36

Seznam použitých symbolů a zkratek

$\cos\varphi$	Účíník [-]
f	Frekvence [Hz]
f_l	Frekvence statoru [Hz]
$jX_{1\sigma}$	Rozptylová reaktance statoru [Ω]
$jX_{2\sigma}$	Rozptylová reaktance rotoru [Ω]
M	Moment motoru [Nm]
M_N	Jmenovitý moment motoru [Nm]
n	Otáčky [min^{-1}]
n_s	Synchronní otáčky [min^{-1}]
p	Počet pólových dvojic [-]
R	Elektrický odpor [Ω]
R_l	Elektrický odpor statorového vinutí [Ω]
R'_2	Elektrický odpor rotorového vinutí [Ω]
R_{Fe}	Odpor v železe [Ω]
s	Skluz [-]
T	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]
U	Napětí [V]
U_N	Jmenovité napětí [V]
Z	Impedance [Ω]

Seznam použitých obrázků

Obrázek č.1.1	Trojfázový asynchronní motor v řezu (klecový).....	13
Obrázek č.1.2	Stator stroje.....	14
Obrázek č.1.3	Řez rotorem (kotva nakrátko).....	15
Obrázek č.1.4	Náhradní schéma jednofázového asynchronního stroje.....	16
Obrázek č.1.5	Instruktažní schéma měniče frekvence.....	18
Obrázek č.1.6	Momentová charakteristika asynchronního stroje pro 3 stavy.....	19
Obrázek č.1.7	Momentová charakteristika asynchronního motoru.....	19
Obrázek č.2.1	Oteplovací a ochlazovací charakteristika.....	20
Obrázek č.2.2	Grafická konstrukce ustáleného oteplení.....	21
Obrázek č.3.1	Tepelné čidlo umístěno na statorovém vinutí stroje.....	23
Obrázek č.4.1	Schéma zapojení a popis pro měření oteplovací charakteristiky.....	24
Obrázek č.4.2	Zapojení celého měřicího mechanismu.....	25
Obrázek č.4.3	Štítek měřeného asynchronního motoru.....	25
Obrázek č.4.4	Štítek asynchronního dynamometru.....	26
Obrázek č.4.5	Popis a rozmístění teplotních čidel na konstrukci motoru.....	27
Obrázek č.4.6	Detailní obrázek svorkovnice a umístění čidla č.3.....	27
Obrázek č.4.7	Charakteristika jmenovitého proudu v průběhu měření.....	28
Obrázek č.4.8	Charakteristika jmenovitých otáček v průběhu měření.....	29
Obrázek č.4.9	Charakteristika jmenovitého výkonu v průběhu měření.....	29
Obrázek č.4.10	Ukázka tabulky pro zaznamenávání hodnot během měření.....	30
Obrázek č.4.11	Obrázek všech fází napětí a proudu s vyznačeným zpožděním.....	31
Obrázek č.4.12	Záznam oteplovacích charakteristik pro 434s (7,23 min).....	32
Obrázek č.4.13	Záznam oteplovacích charakteristik pro 1023s (17,05 min).....	32
Obrázek č.4.14	Záznam před ukončením měření pro 3029s (50,48 min).....	33
Obrázek č.4.15	Celková charakteristika pro celou dobu měření pro 4.čidlo.....	33
Obrázek č.4.16	Ukázka konstrukce ustálené hodnoty oteplení pro 1.čidlo.....	34

Seznam použitých tabulek

Tabulka č.4.1	Tabulka jmenovitých hodnot v průběhu měření.....	28
Tabulka č.4.2	Ukázka tabulky se záznamem hodnot s měření po dobu 10s.....	34
Tabulka č.4.3	Tabulka ustálených hodnot všech čtyř čidel.....	35

Úvod

Pro bakalářskou práci jsem si vybral téma měření oteplení konstrukčních částí asynchronního motoru při napájení ze sítě. Toto téma jsem si vybral z důvodu, že v dnešní době je asynchronní motor jeden z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších motorů vůbec. Je to způsobeno tím, že patří mezi velice jednoduché stroje s vysokou spolehlivostí, malou náročností na údržbu a hlavně nízkou pořizovací cenou.

Cílem této bakalářské práce je změřením oteplovací charakteristiky asynchronního motoru, který je napájen ze sítě a po celou dobu měření jsou udržovány konstantní jmenovité hodnoty. V závěru je zhodnocení celého tohoto měření a popis jeho problematiky.

Celá bakalářská práce je rozdělena do čtyř kapitol.

V první kapitole je popisována konstrukce asynchronního motoru. Především jeho problematika a principy rozběhu a regulace otáček a také popis problematiky momentu stoje.

Ve druhé kapitole jsem se věnoval oteplovací charakteristice, možnostem přestupu tepla a také grafické konstrukci ustáleného oteplení.

Ve třetí kapitole jsem se zaměřil na tepelné ochrany a oblast chránění motoru proti vysokým teplotám. Také jsou zde popsány způsoby tohoto chránění.

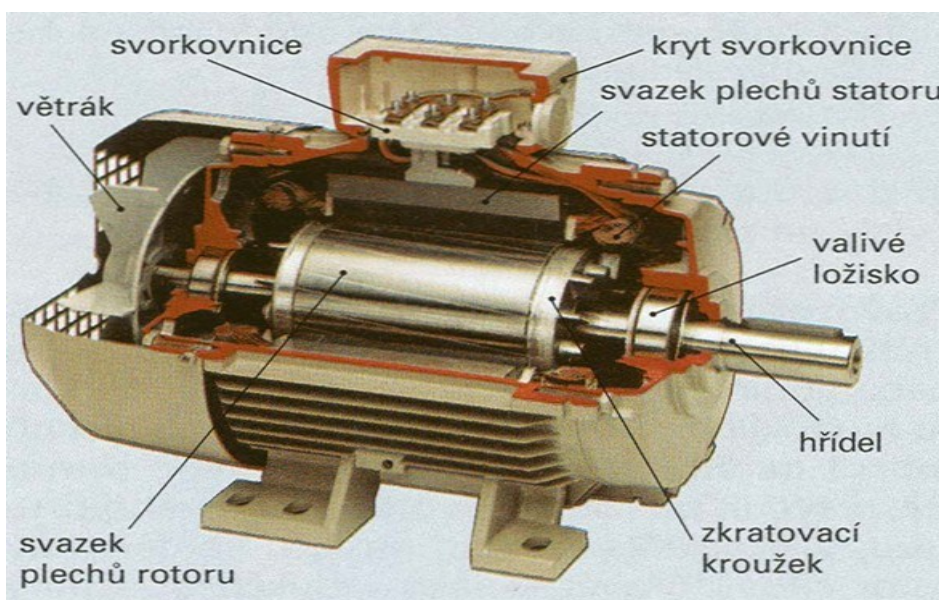
Ve čtvrté kapitole je celková problematika prováděného měření. Je zde popsán celý postup měření včetně jeho celkového zhodnocení a výpočtů všech hodnot.

1. Asynchronní stroje

1.1 Použití

V dnešní době patří asynchronní stroj k nejrozšířenějším pohonům vůbec. Jsou nejpoužívanější, protože patří mezi nejjednodušší a zároveň nejspolehlivější pohony, které nevyžadují tak častou údržbu. Asynchronní stroj jako takový jde provozovat ve dvou stavech. První stav je motor, který spotřebovává dodanou elektrickou energii ze sítě a mění ji na energii pohybovou v podobě momentu, který se vytváří na hřídeli stroje. Tento typ stroje se pak nejčastěji používá pro pohon jeřábů, pásových dopravníků, například v dolech a mnoha dalších oblastech strojího průmyslu a pod. Druhá možnost, jak je možné tento stroj provozovat je v generátorickém režimu, kdy se přivádí energie pohybová ve formě momentu na hřídel stroje a tento stroj po zvýšení otáček nad otáčky jmenovité začne měnit energii mechanickou na energii elektrickou. Tento typ stroje není již tak moc rozšířen jako motor, ale lze jej využít pro provoz menších vodních elektráren. [1]

1.2 Konstrukce



obr.1.1 Trojfázový asynchronní motor v řezu (kolečový) [5]

1.2.1 Všeobecný popis konstrukce

Základní rozdělení asynchronního stroje je jednoduché, jelikož se skládá ze dvou hlavních částí, které jsou nezbytné pro jeho provoz. Jedná se o stator a rotor, který si popíšeme podrobněji v dalších kapitolách. Dalším důležitým prvkem tohoto stroje jsou ložiska, která jsou zde proto, aby zvyšovaly účinnost stroje, ale také proto, aby snižovaly mechanické ztráty, které tento stroj při svém chodu vytváří. Neméně důležitou částí je samotné chlazení stroje, protože základem konstrukce tohoto typu stroje je odvod tepla a tím snížení jeho namáhání při vysokých teplotách. To má za následek i prodloužení jeho životnosti. Způsoby chlazení můžeme rozdělit na tři druhy (přirozené, vlastní, cizí).

Přirozené chlazení je takové, že stroj sám předává tepelnou energii do okolí. Vlastní chlazení je takové, že na samotné hřídeli je umístěn ventilátor, který přivádí studený vzduch z okolí a tím daný stroj ochlazuje. Vlastní se nazývá proto, že je usazen přímo na hřídeli stroje, tím pádem nepotřebuje žádný cizí zdroj, který by ho napájel a je aktivní po celou dobu provozu stroje. Tento způsob chlazení je dle mého názoru velice efektivní i v tom, že pokud stroj dosáhne vyšších teplot, stačí stroj odlehčit, nechat nějakou dobu běžet naprázdno, aby se sám opět dostal na jmenovité provozní teploty. Posledním způsobem, jak je možné tento stroj chladit, je cizí chlazení, jež je tvořeno cizím ventilátorem, který již není vůbec závislý na samotných otáčkách stroje a je výhodný v tom smyslu, že i když rotor stojí a protéká jím proud, je nepřetržitě ochlazován. [1]

1.2.2 Stator

Stator asynchronního stroje je část, která je pevně uchycená ke kostře stroje. Je tvořen z plechů pro elektrotechniku a ve vnitřní části jsou vytvořené drážky, které slouží pro navinutí trojfázového statorového vinutí. Stator se vyrábí z plechů z důvodu omezení ztrát vířivými proudy a hysterezních ztrát.



obr. 1.2 Stator stroje [6]

1.2.3 Rotor

Rotor se může vyrábět více technologickými postupy. Každý z nich má své výhody, ale také i své nevýhody.

Kotva nakrátko (klecový) - vyrábí se tak, že se do drážek vysokotlakým litím vpraví hliník, který není nijak odizolován od zbytku rotoru. Konce těchto tyčí jsou vždy na stranách rotoru spojeny nakrátko. Tomuto typu se říká také klecový, to je způsobeno tím, že kdyby se vyjmulo hliníkové vinutí, tak by vypadalo jako klec. [1]

Vinutý - je vytvořen podobným způsobem jako stator. V drážkách plechů je umístěno tentokrát rotorové vinutí, které může být zapojeno do hvězdy nebo trojúhelníku. Dále je rotorové vinutí vyvedeno na tři kroužky uložené na hřídeli motoru. Pro další vedení na kroužky motoru doléhají takzvané kartáče. Toto provedení motoru je pak výhodné například pro další regulaci, protože můžeme bez problémů připojit k rotoru například další odpor, který se může využít pro brzdění, nebo pro omezení proudového nárazu motoru. [1]



obr.1.3 Řez rotorem (kotva nakrátko) [7]

1.3 Princip činnosti asynchronního stroje

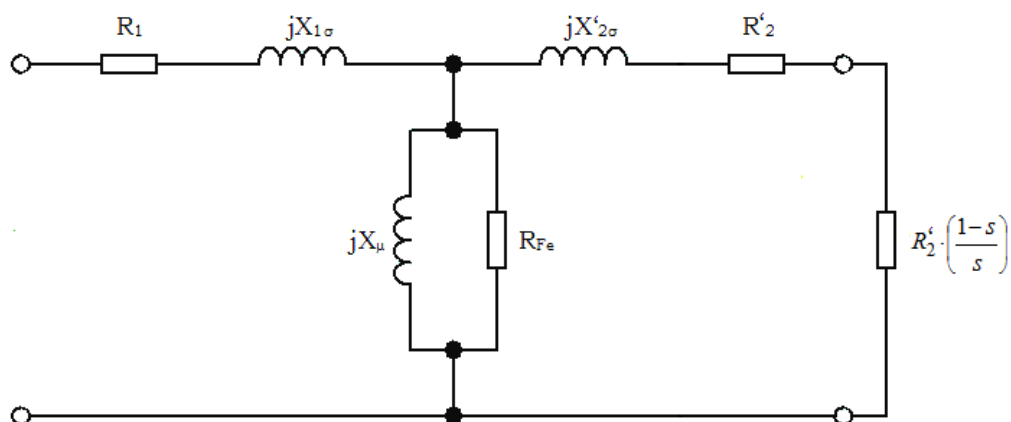
Asynchronní stroj se skládá ze dvou hlavních částí. Jedná se o stator, který je upevněn staticky ke kostře stroje a druhou částí je rotor, který je upevněn na hřídeli stroje a může se volně otáčet na ložiscích. Činnost asynchronního stroje je založena na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole vzniklého mezi statorem a rotorem. Vznik točivého magnetického pole začíná v cívkách statoru, které jsou napájené střídavým proudem. Tím se začne v rotoru indukovat elektrické napětí a začne jím procházet elektrický proud. Toto má za následek vytvoření pohybové síly, která začne tímto rotorem otáčet. Nejčastěji se používá pro třífázový stroj, který má statorové cívky mezi sebou pootočené o 120° a tím pádem není nutno dodat žádný prvotní impulz, aby se stroj roztočil sám bez pomoci. Lze jej ale provozovat i jako jednofázový stroj jen s tím rozdílem, že se musí přidat rozběhové vinutí s kondenzátorem, které pootočí rotor o dalších 90° a tím se vytvoří točivé magnetické pole. [1]

1.4 Náhradní schéma asynchronního stroje

Náhradní schéma asynchronního stroje vychází už z náhradního schématu transformátoru. Jsou zde ale jisté rozdíly, které jsou velice důležité pro samotný chod stroje.

Hlavním rozdílem je to, že mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera, která je zde z více důvodů. Prvním z nich je ten, že na rozdíl od transformátoru má asynchronní stroj točivou část, která tvoří mezi rotorem a statorem vzduchovou mezeru, jež stroji umožní otáčivý pohyb. Jak již napovídá

slovo asynchronní stroj, tak je zde rozdíl. Tento rozdíl je způsoben skluzem, o kterém si ještě povíme v další části, ale tento skluz má za následek to, že jak stator, tak rotor stroje má rozdílnou frekvenci. [1]



Obr.1.4 Náhradní schéma jednofázového asynchronního stroje [1]

R_1 - odpor statorového vinutí

R'_2 - odpor rotorového vinutí

$jX_{1\sigma}$ a $jX_{2\sigma}$ - rozptylové reaktance statoru a rotoru

jX_μ - magnetizační reaktance

R_{Fe} - odpor v železe

1.5 Problematika rozběhu

Samotný rozběh asynchronních motorů není problémem do velikosti výkonu jednotek kW. Problém ale již nastává s rozběhem větších motorů, které se nedoporučují připojovat přímo na síť z důvodu velkého záběrného proudu a tím i ohrožených dalších spotřebičů, které jsou připojeny na totožné síti. Toto nemusí ale platit vždy, záleží zde i na tzv. tvrdosti sítě. Pokud máme k dispozici tvrdou síť, jako jsou ty v elektrárnách, můžeme na tuto síť připojit motor o výkonu jednotek megawattů. Toto je ale věc, kterou lze v dnešní době řešit několika způsoby, popíšeme si zde některé z nich. [1]

1.5.1 Přepínáním Y/D

Regulace tímto způsobem má určité nedostatky. Jedním z nich je, že záběrný proud sice klesne v danou chvíli na jednu třetinu, ale musíme mít také na paměti, že tímto poměrem poklesne i moment tohoto stroje. Proto se toto dá využívat výhradně pro krátkodobý start stroje a po dosažení jmenovitých otáček je nutné přepnout motor do trojúhelníku. [1]

1.5.2 Změna odporu rotoru

Dalším způsobem, jak lze zamezit tomuto jevu je možnost měnit velikosti odporu rotoru. Tento způsob je možný pouze u kroužkových motorů, jelikož je nutné při spouštění zvětšit odpor rotoru pro nutné snížení záběrného proudu. Také je ale nutné po rozběhu motorů nejlépe postupně nebo plynule odpor snižovat, až do spojení vinutí na krátko pro zvýšení účinnosti. Tento jev je známý z Ohmova zákona. [1]

$$I = \frac{U}{Z}$$

1.5.3 Spouštění softstartérem

Softstartér je takzvaný postupný zvyšovač napětí a omezovač momentu vytvořený z antiparalelního zapojení tyristoru. Problém u tohoto typu rozběhu je ten, že s postupným zvyšováním napětí od nuly je i v tuto chvíli nulový moment tak, že je potřeba vytvořit takový primární impulz napětí, aby se motor sám roztočil. Tomuto typu napětí se říká takzvané inicializační napětí. Po rozběhu motoru již není důvod napětí dále omezovat, proto se pak napětí zvýší na hodnotu jmenovitého napětí. [1]

1.5.4 Spouštění měničem frekvence

Měnič frekvence je druhou alternativou k softstartéru, která má využití nejen pro rozběh motoru, ale dá se využívat i na regulaci otáček. Jedná se o zařízení, které je realizováno tak, že postupným zvyšováním frekvence má motor dostatečný moment na to, aby se dal sám do pohybu a nevznikly při tomto stavu žádné proudové nárazy. [1]

1.6 Regulace otáček

Je zřejmé, že málokterý motor pracuje po spuštění pořád při stejných otáčkách. Vždy je nutné tyto otáčky nějak zvyšovat nebo snižovat z různých důvodů a tím daný motor regulovat. Otáčky asynchronního motoru je možno regulovat třemi způsoby, jak je vidět ze vztahu pro výpočet otáček a skluzu. [1]

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s)$$

1.6.1 Změna skluzu

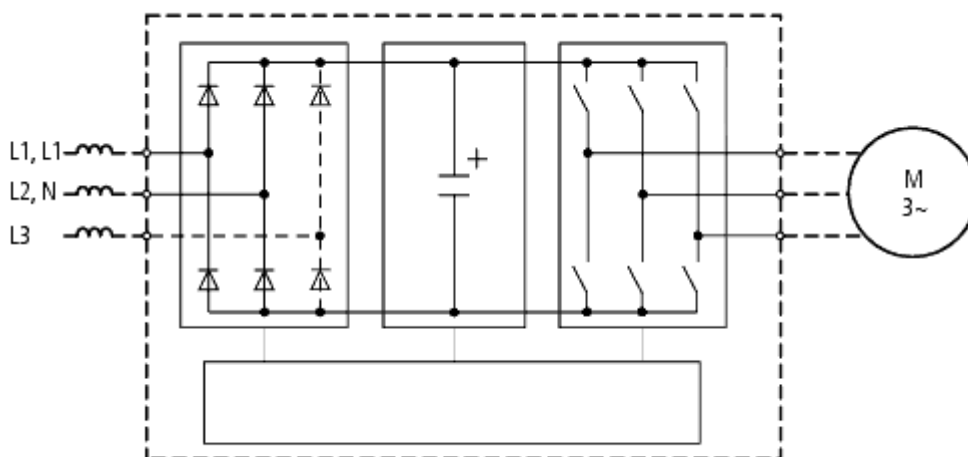
Prvním způsobem jak lze měnit otáčky stroje je změnou skluzu. Toto bohužel platí pouze u kroužkových motorů. Může se realizovat dvěma způsoby, buď změnou odporu v rotorovém obvodu, nebo přivedením proti napětí do rotorového obvodu. [1]

1.6.2 Změna počtem pólů

Druhou možností je řízení otáček změnou počtem pólů, což se může používat při přepínání na dvojitou hvězdu nebo trojúhelníku na dvojitou hvězdu. [1]

1.6.3 Změnou frekvence

Posledním způsobem, jak lze měnit otáčky, je změna statorové frekvence. Tento způsob regulace je v dnešní době nejrozšířenější a s nástupem frekvenčních měničů se velice zjednodušil a oblíbil. K samotné změně frekvence se nejčastěji používají nepřímé měniče frekvence, které se skládají ze 3 částí (usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu a střídače). Princip je velice jednoduchý. V prvním kroku se napětí sítě pomocí usměrňovače usměrní. Dále se z tohoto napětí vytváří nová třífázová síť pro pohon motoru s různou hodnotou napětí a také frekvence. Z toho vyplývá, že dosud jsme využívali pouze činnou energii ze sítě, ale je nutné také dodat jalový výkon, který je také potřebný pro chod motoru. Tuto funkci vykonává stejnosměrný meziobvod, který je tvořen kondenzátorem a ten kompenzuje jalový výkon. Výstupní napětí z měniče není ideálně sinusové a obsahuje harmonické složky, proto vznikají ve stroji větší ztráty, než tomu je při napájení ze sítě. [1]



Obr.1.5 Instrukční schéma měniče frekvence [1]

1.7. Moment asynchronního stroje

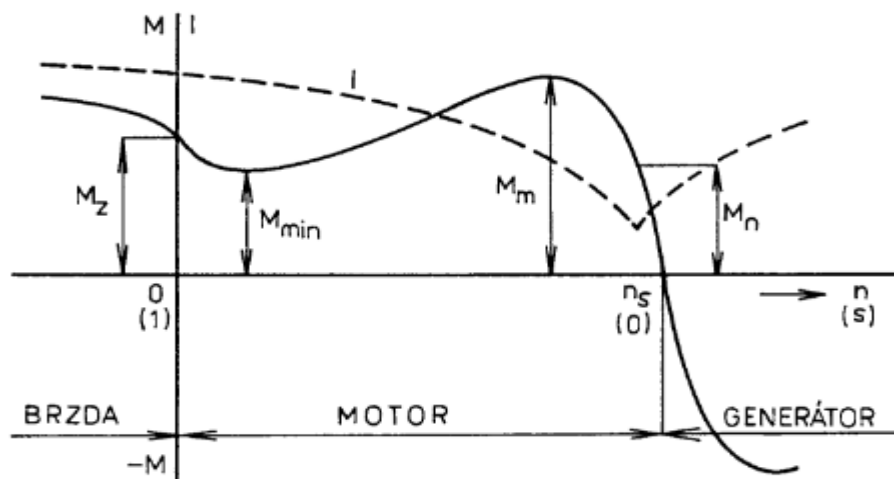
Moment můžeme obecně popsát jako sílu, která působí na těleso o daném poloměru. Když to převedeme na asynchronní stroje, tak je moment velice důležitý parametr, jelikož v motorickém režimu je moment asynchronního motoru veličina, kterou dostaneme na hřídeli stroje. [1]

V generátorickém režimu je moment nutnou veličinou, kterou zase musíme asynchronnímu generátoru dodat, aby jsme mohli tuto energii přeměnit na energii elektrickou.

1.7.1 Momentová charakteristika asynchronního stroje

Asynchronní stroj, jak je vidět z momentové charakteristiky na obrázku číslo 1.6, je možné provozovat ve třech různých režimech. Prvním a nejčastěji používaným režimem je motor, kde skluz se může pohybovat od hodnoty nula do hodnoty jedna. Otáčky se také mohou pohybovat od nulových

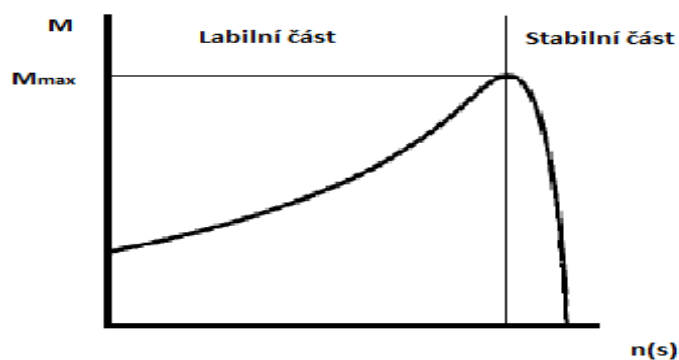
až do synchronních otáček. V generátorickém režimu se skluz pohybuje od nuly po hodnotu minus jedna a otáčky, kterými se otáčí rotor, jsou vyšší než otáčky synchronní. Posledním režimem je brzda, kde skluz je větší než jedna a rotor se točí opačným směrem než magnetické pole statoru. [1]



Obr.1.6 Momentová charakteristika asynchronního stroje pro 3 stavy [8]

1.7.2 Popis momentové charakteristiky motoru a jejích částí

V motorické části momentové charakteristiky můžou nastat dva rozdílné stavy. Jednou částí momentové charakteristiky je labilní část, ve které je motor od svého spuštění do doby než dosáhne maximálního momentu. Druhou částí je stabilní část, kde se při malé změně otáček mění moment v celém svém možném rozsahu. Motor se provozuje ve stabilní části momentové charakteristiky, protože v labilní části jsou proudy statoru a rotoru několikanásobně větší, než jmenovité hodnoty proudu a proto není možný v této části trvalý provoz. [1]



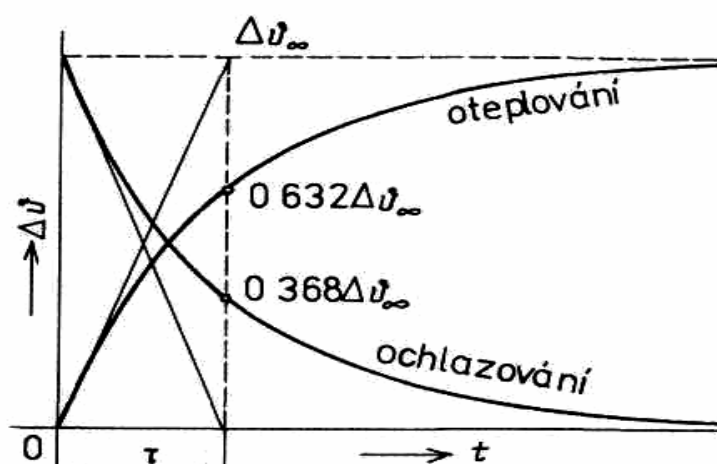
Obr.1.7 Momentová charakteristika asynchronního motoru [1]

2. Oteplování asynchronního motoru

Asynchronní motor je takové elektrické zařízení, ve kterém si můžeme představit, že se v jeho různých částech vytváří buď třením, nebo průchodem elektrického proudu teplo. Toto teplo pak proudí od místa vzniku okolo sousedních těles až na povrch tělesa, kde uniká do prostoru. Avšak veškeré teplo neunikne, zbytek tepla ohřívá okolní tělesa a tím část tepla zůstane uvnitř motoru. Nejvíce záleží na materiálu, ze kterého je daný motor sestaven. Každý materiál se totiž chová při různých teplotách jinak a má jinou teplotní pevnost a mnoho dalšího. [3]

2.1 Oteplovací a ochlazovací charakteristika

Každé těleso má vlastní oteplovací a ochlazovací křivku. Je to křivka, kde se zaznamenává průběh nárůstu nebo poklesu teploty v čase. Tato křivka má exponenciální charakter, jelikož stroj po zapnutí má teplotu okolí. Pozvolným zatěžováním stroje se hodnota teploty postupně zvyšuje, až do maximální hodnoty oteplení. Maximální hodnota oteplení je nejvyšší teplota, kterou dané těleso dosáhne a tato hodnota se pak v určitém čase ustálí. [3]



Obr.2.1 Oteplovací a ochlazovací charakteristika [3]

2.2 Druhy přestupu tepla

Prvním způsobem, jak je možné přenášet teplo uvnitř pevných těles je vedením tepla. To znamená, že v místě vzniku se teplo přenáší dál dotykem s jinými částmi daného stroje. Teplo jako energie vytváří jako elektrická energie kolem sebe pole, které se nazývá tepelné pole. [3]

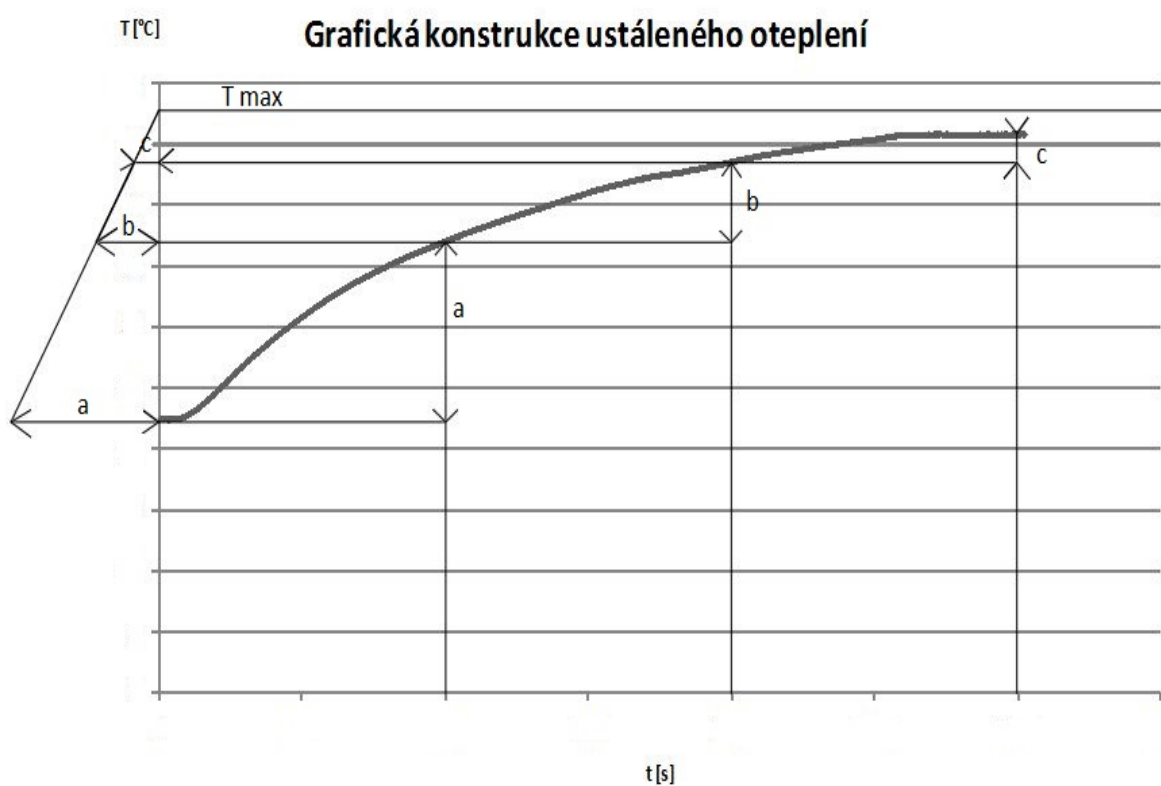
Další způsob, jak se teplo přenáší dál od místa vzniku do okolního prostředí, je prouděním. Tento typ přenosu tepla není možný uplatnit u pevných látek, ale pouze u kapalin a plynů. [3]

Posledním způsobem je přenos tepla sáláním neboli zářením. Každé těleso s teplotou větší než je teplota absolutní nuly vyzařuje do svého okolí teplo ve formě elektromagnetických vln, které se šíří v prostředí všemi směry. [3]

2.3 Grafická konstrukce ustáleného oteplení

Grafická konstrukce ustáleného oteplení se používá v případě, kdy po celou dobu měření oteplovací charakteristiky nedosáhneme na hodnotu maximální teploty, při které se nám tato křivka ustálí. Pokud jsme se nedostali na tuto hodnotu, můžeme použít tento postup.

Časovou osu, tedy osu x , si rozdělíme na tři stejné úseky pomocí tří čar, které jsou kolmé na osu x . Jako další krok vytvoříme rovnoběžku s osou x z bodu s nejnižší teplotou a toto opakujeme pro všechny tři křivky, které nám protnuly oteplovací charakteristiku. Tyto vzniklé vzdálenosti pouze přeneseme jako rovnoběžky s osou x . Koncové body těchto tří přímek pouze proložíme další přímkou a v místě, kde nám tato přímka protne osu y , získáme hodnotu ustáleného oteplení. [9]



Obr.2.2 Grafická konstrukce ustáleného oteplení

3. Tepelná ochrana strojů a její popis

Tepelné ochrany strojů, by měly být vytvořeny tak, aby ochránily všechny citlivé části stroje před vysokými teplotami, na které již samotný stroj a jeho součásti nejsou dimenzovány. Toto nastavení není nijak jednoduché, jelikož je nutné nastavit ochranu tak, aby nevypínala stroj při příliš malých teplotách, ale naopak, aby vypínala stroj při příliš vysokých teplotách. Protože s vyšší teplotou, při které je stroj provozován, klesá životnost jeho komponentů, ale také stroje jako celku. [4]

3.1 Je důležité motor chránit?

Toto můžeme popsat mnoha různými důvody. Jedním z nich je ten, že v dnešní době se tyto motory používají v různých typech průmyslu, kde mohou být na těchto motorech zcela závislí. Vezmeme si jako příklad motor, který je umístěn v elektrárně, kde pohání mlýn, který mele uhlí na požadovanou velikost. Při poruše tohoto zařízení je nutná odstávka do doby, než bude tento motor vyměněn za jiný, nebo než bude opraven. Tento problém může trvat řádově pár hodin, ale při zjištění například dalších problémů spojených s tímto se to může protáhnout klidně i na den nebo déle. Když vezmeme v úvahu, jak dlouho trvá pouhé spouštění tepelné elektrárny, tak si uvědomíme, že pouhou instalací různých ochran motoru můžeme tomuto předejít. Z tohoto pohledu můžeme vidět, že ochrana motoru není věcí pouze technickou, ale také i marketingovou. [4]

3.2 Hlavní funkce ochrany

Elektromotory odebírají elektrickou energii z napájecí sítě a mění ji na energii mechanickou. Toto jsme si již popisovali, ale při tom vznikají další ztráty, které způsobují oteplení motoru. Hlavními problémy při častém překračování provozních teplot stroje jsou: velká četnost spouštění, zablokovaný rotor, výpadek fáze a další. Hlavní funkcí ochrany motoru je zamezit nadměrnému růstu teploty statoru a rotoru. To znamená, že je nutné motor odpojit dříve, než překročí mezní teplotu, na kterou je motor konstruován. Zároveň motor nesmí být odpojen během rozběhu, nebo během brzdění. [4]

3.3 Rozběh motoru

Je to okamžik, který je jeden z nejnamáhavějších z pohledu motoru, protože při rozběhu, kdy se otáčky postupně zvyšují od nuly na hodnoty jmenovité, odebírá motor mnohem větší proud, než během chodu. Teplota vinutí jak statoru i rotoru vzroste za dobu několika sekund několikanásobně. Je to způsobeno tím, že za tuto dobu okolní železo nestačilo zvýšit svou teplotu natolik, aby toto teplo odvádělo pryč. Proto je důležité vzít v potaz dobu rozběhu motoru, po kterou by tepelná ochrana neměla zareagovat. [4]

3.4 Druhy ochran

Ochrany můžeme rozdělit na dvě hlavní části, které se dělí podle toho, jak měří teplotu.

- **Proudově závislé**

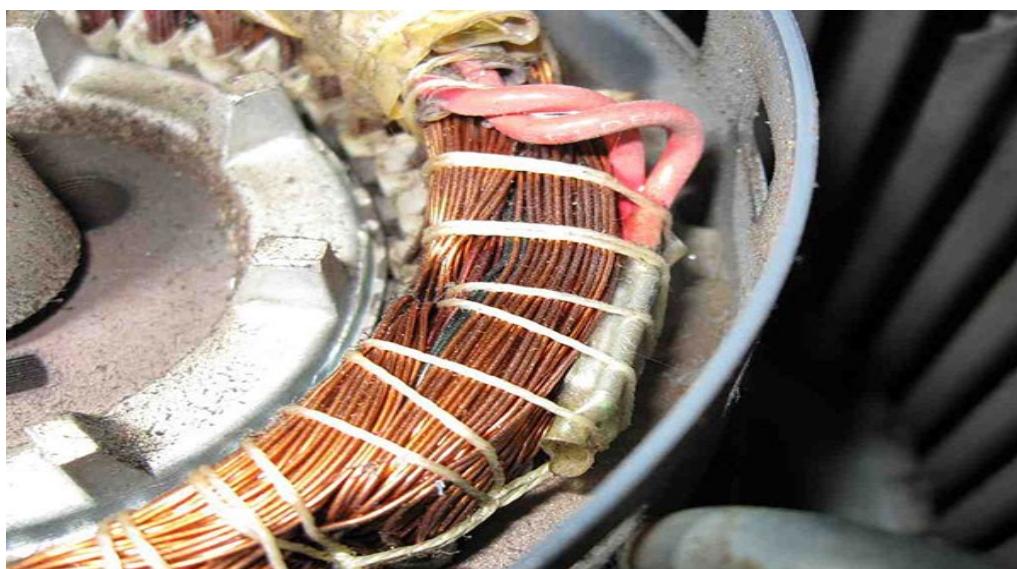
- **Proudově nezávislé**

Jako první si popíšeme proudově závislý. Tento typ spočívá v tom, že teplota vinutí motoru je vyhodnocována nepřímou. Tato ochrana chrání motor před nadměrným oteplením tak, že hlídá proud, který motorem protéká. Doba vypnutí závisí na poměru vypínacího a nastaveného proudu a je možné ji odečíst na vypínací charakteristice ochrany. Čím větší hodnoty dosáhne provozní proud, tím kratší by měla být doba vypnutí motoru. [4]

Pro tento typ ochrany se převážně používají tepelná nadproudová relé, nebo jistič s tepelnou spouští. Výhoda samotného jističe oproti relé je ta, že jistič dokáže reagovat nejen na nadměrnou teplotu, ale dokáže také vypnout zkratový proud. [4]

Druhým způsobem je přímé měření, které je prováděno tak, že přímo do vinutí motoru je již od výrobce umístěno čidlo, které snímá teplotu a tím dokáže po vyhodnocení vypnout motor. [4]

Na tento způsob se používají termistorová relé, nebo měřící relé teploty.

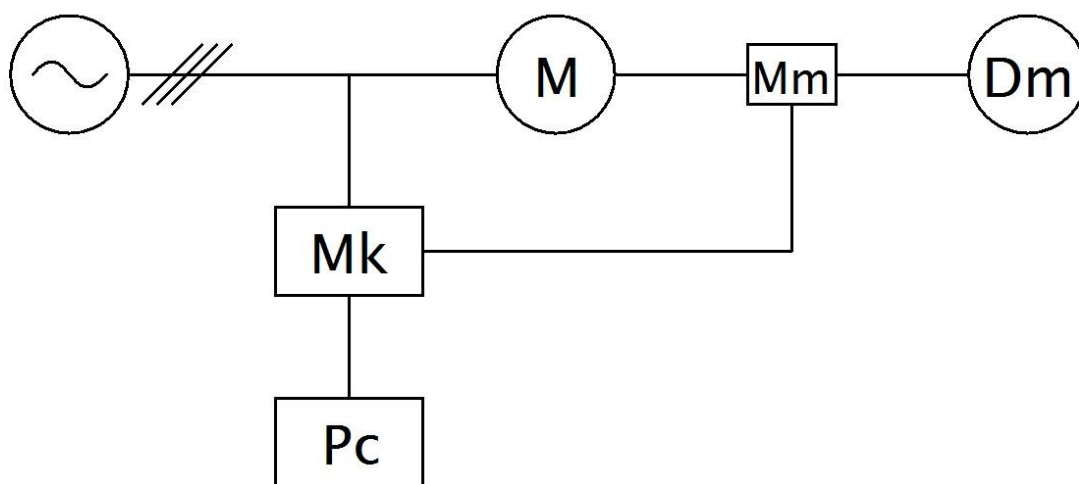


Obr.3.1 Tepelné čidlo umístěno na statorovém vinutí stroje [2]

Pro praktickou ukázkou této problematiky jsem si vybral měření oteplovací charakteristiky asynchronního motoru značky Siemens, který je napájen ze sítě. Tento motor byl po celou dobu měření s mírnými odchylkami zatěžován jmenovitými hodnotami uvedenými na štítku motoru. Tyto odchylky byly způsobeny samotným zahříváním motoru a tedy růstu hodnoty jeho odporu. Na tento motor byly umístěny 4 sondy, které po celou dobu měření zachycovaly teploty daného umístění.

4. Měření oteplovací charakteristiky

4.1. Schéma zapojení



M - Asynchronní motor

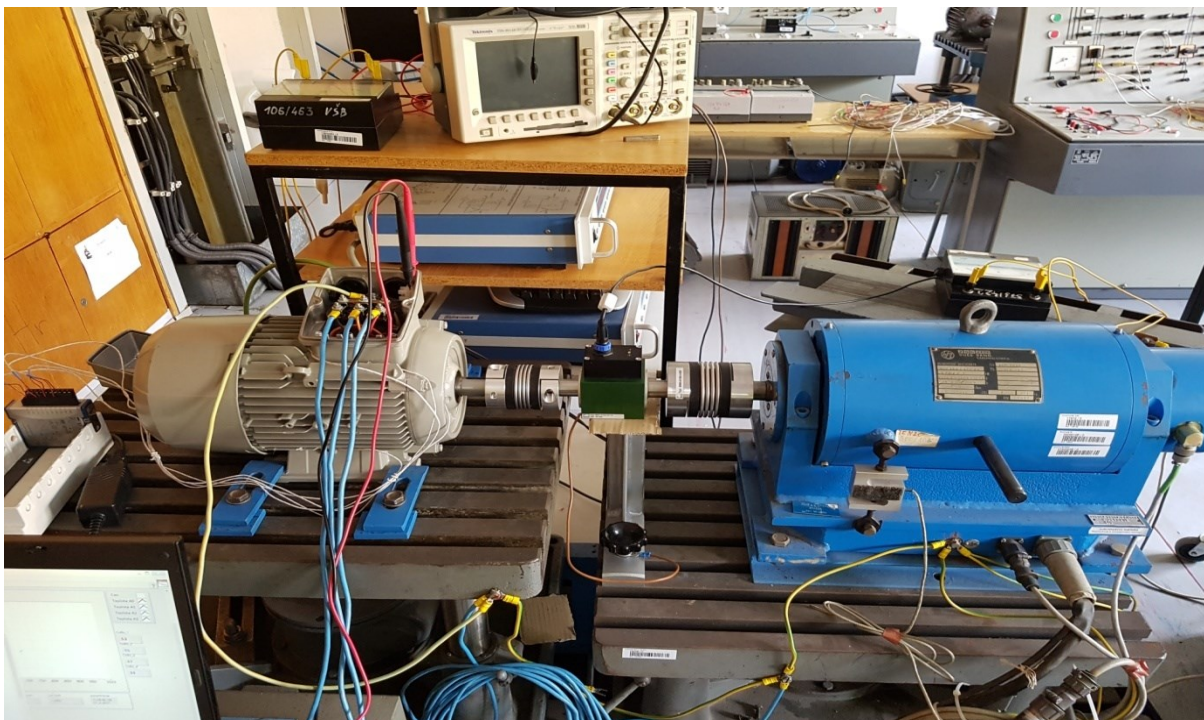
Mm - Měřič momentu

Dm - Dynamo metr

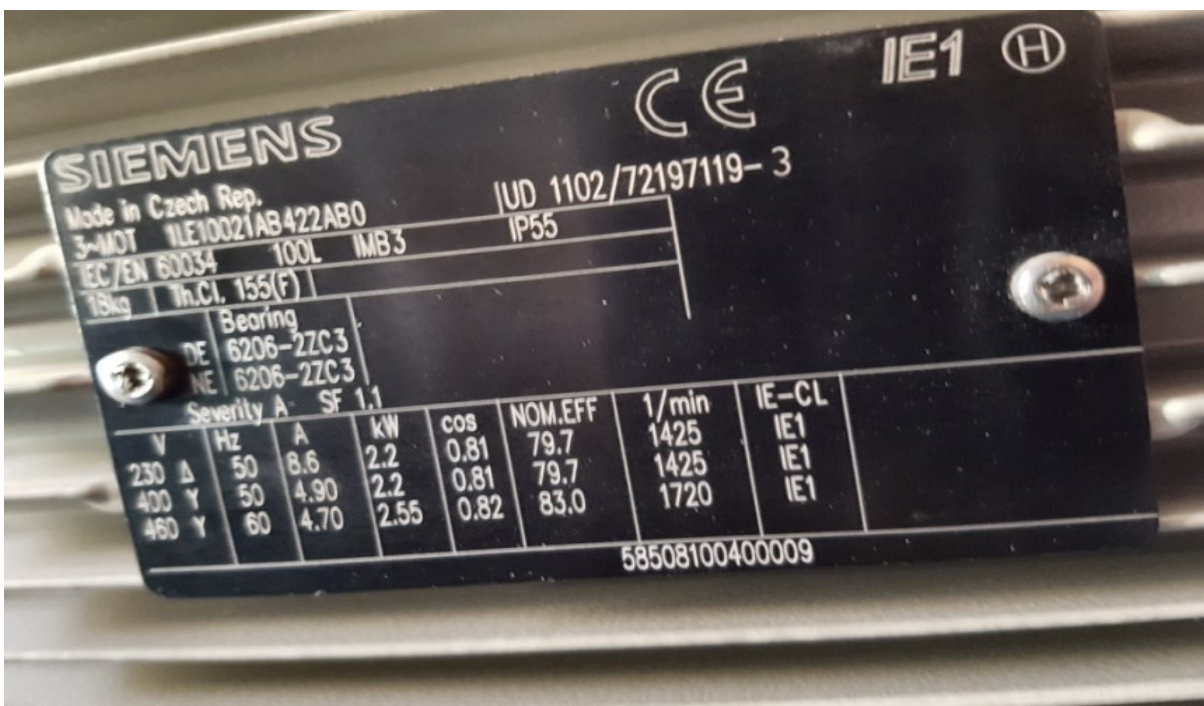
Mk - Měřicí karta

Pc - Počítač

Obr.4.1 Schéma zapojení a popis pro měření oteplovací charakteristiky asynchronního motoru



Obr.4.2 Zapojení celého měřicího mechanismu



Obr.4.3 Štítek měřeného asynchronního motoru



Obr.4.4 Štítek asynchronního dynamometru

4.2 Postup měření

Jako první se uvedl do provozu dynamometr. Poté se nastavily na asynchronním motoru jmenovité hodnoty pro napájení z třífázové sítě. Jako další krok se spustilo měření na počítači v programu labwiev, který zaznamenával celou dobu měření pomocí 4 teplotních čidel upevněných na konstrukční části motoru. Bohužel jsem nemohl využít interního snímače teploty vinutí PT100, protože není k dispozici žádný převodník, který by rovnou převáděl hodnoty odporu vinutí na teplotu. Jako poslední se natvrdo připojil motor, který je pevně spojen pomocí hřídele, na které je umístěn měřič momentu s dynamometrem. Toto měření se provádělo po dobu 50 minut a po celou tuto dobu byl motor zatěžován konstantními jmenovitými hodnotami. Během měření se pouze občas nepatrně doladily otáčky tak, aby byl motor opravdu zatěžován po celou dobu měření konstantně. Tyto minimální odchylky byly způsobeny samotným zahříváním tohoto motoru.

4.3 Průběh celého měření

4.3.1 Popis čidel

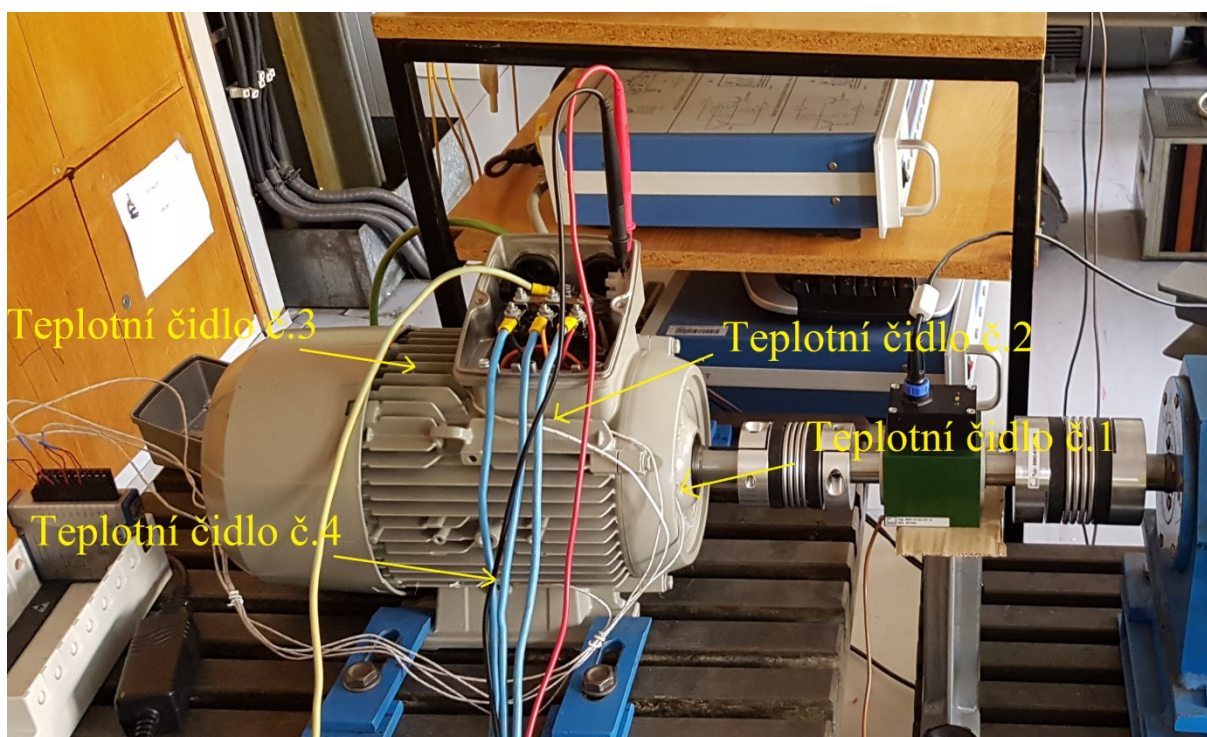
Na daný asynchronní motor značky Siemens o výkonu 2,2 kW byly upevněny pomocí tavné pistole 4 teplotní čidla, která jsou rozmístěna na čtyřech různých místech tak, aby se projevil teplotní rozdíl na konstrukční části celého motoru.

Čidlo č. 1 - Ložiskový štít

Čidlo č. 2 - Spodní část svorkovnice

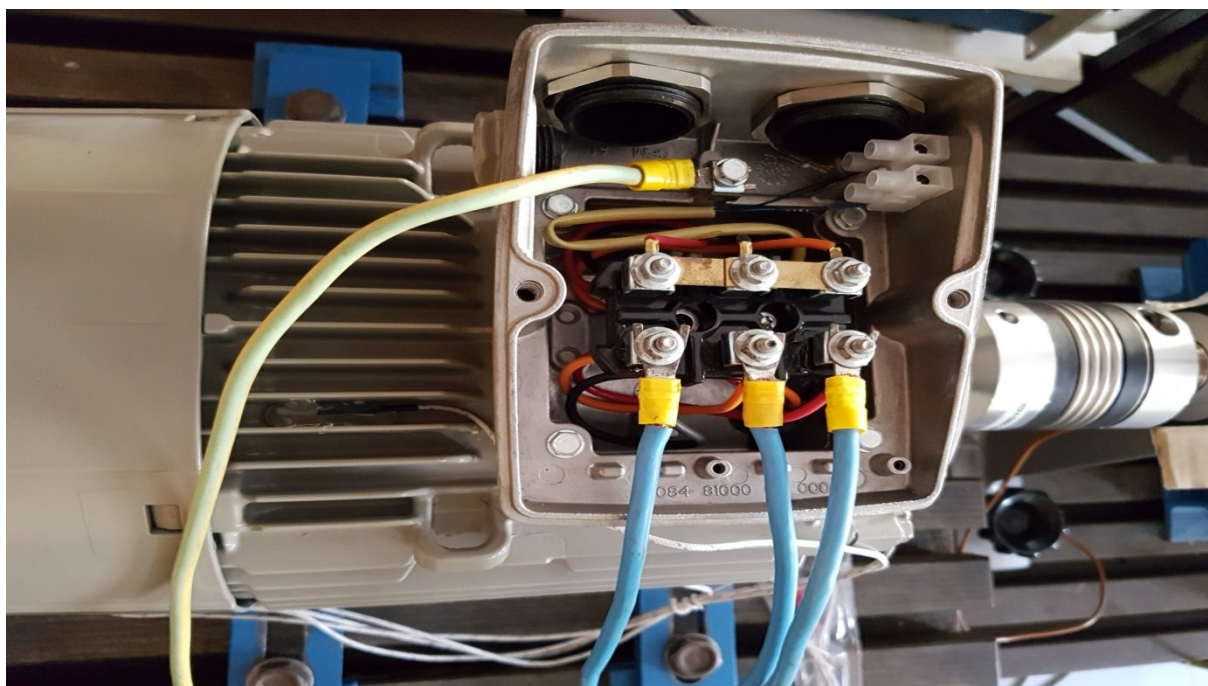
Čidlo č. 3 - Žebrování před svorkovnicí

Čidlo č. 4 - Žebrování těsně nad patkou



Obr.4.5 Popis a rozmístění teplotních čidel na konstrukci motoru

Po spuštění celého měření se již jenom kontrolovaly jmenovité hodnoty asynchronního motoru. Občas bylo nutné některé parametry mírně doladit, což bylo způsobeno rostoucí teplotou, se kterou roste odpor, ale jinak se nastavené hodnoty příliš neměnily.



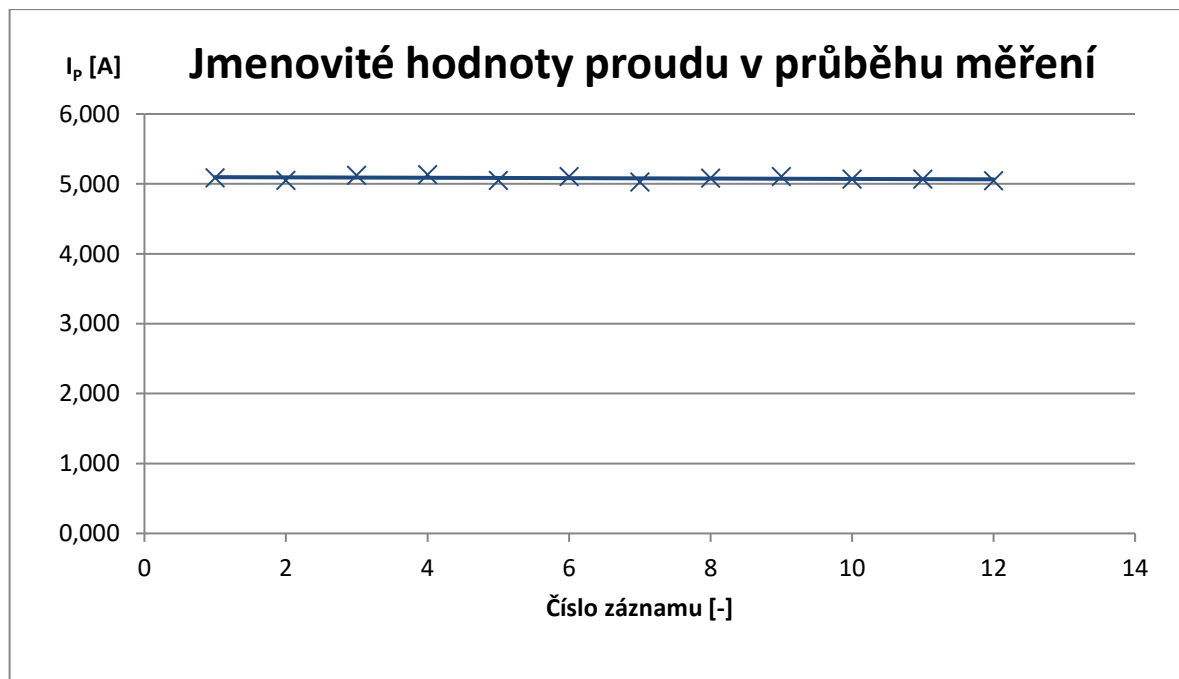
Obr.4.6 Detailní obrázek svorkovnice a umístění čidla č.3

4.3.2 Hodnoty jmenovitých hodnot v průběhu měření a jejich grafy

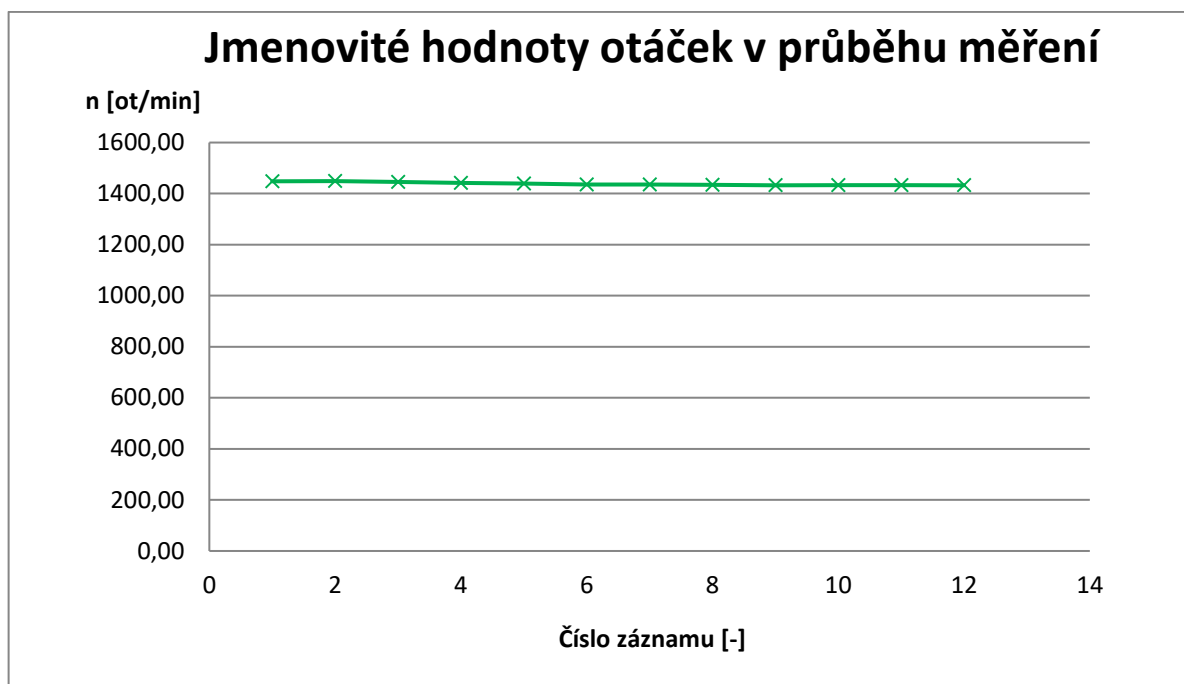
Tab.4.1 Tabulka jmenovitých hodnot v průběhu měření

č.z	U_P	I_P	P_{1P}	S_P	Q_P	$\cos\varphi_P$	M	n	P_{2P}	η	F
[-]	[V]	[A]	[W]	[VA]	[Var]	[-]	[Nm]	[ot/min]	[w]	[%]	[Hz]
1	231,04	5,089	2715,22	3527,28	2251,19	0,7698	-14,61	1448,25	2215,12	81,14	49,99
2	231,30	5,054	2691,69	3506,96	2247,62	0,7675	-14,34	1449,00	2176,10	80,88	49,99
3	231,09	5,124	2761,85	3552,32	2233,73	0,7775	-14,78	1445,25	2236,61	81,71	49,99
4	231,43	5,134	2798,61	3564,85	2207,83	0,7851	-14,88	1441,50	2246,60	80,58	50,01
5	232,13	5,053	2740,55	3518,66	2206,45	0,7789	-14,66	1439,25	2208,77	80,20	50,01
6	230,16	5,109	2802,26	3527,81	2142,88	0,7943	-15,01	1435,50	2255,76	80,52	50,01
7	230,30	5,031	2743,67	3476,22	2134,37	0,7893	-14,63	1435,50	2199,32	80,30	49,98
8	229,66	5,082	2792,44	3501,46	2112,27	0,7975	-14,87	1434,00	2233,07	80,04	49,97
9	231,15	5,108	2804,50	3542,38	2163,72	0,7917	-15,04	1432,50	2256,58	80,23	49,96
10	231,24	5,072	2782,73	3518,60	2152,94	0,7909	-14,78	1433,25	2218,04	79,99	49,97
11	231,32	5,070	2787,32	3518,10	2146,26	0,7923	-14,91	1433,25	2238,36	79,98	50,00
12	231,54	5,046	2770,83	3505,19	2146,38	0,7905	-14,82	1432,50	2222,42	79,88	50,00

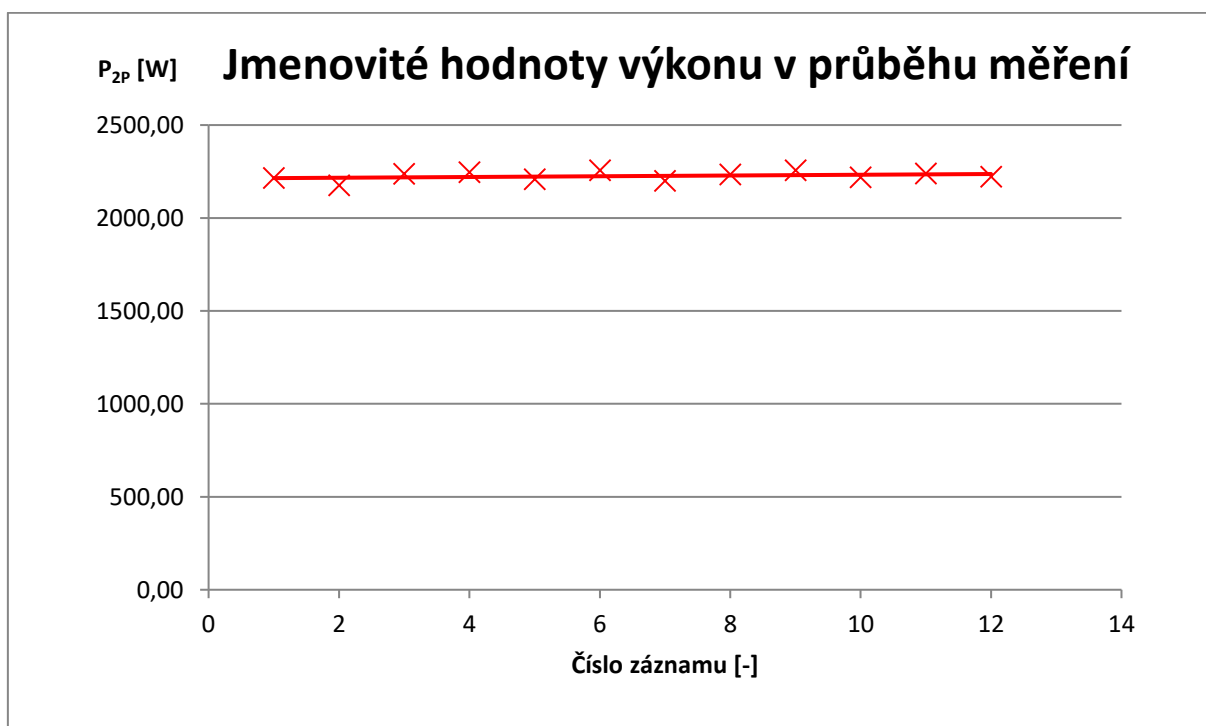
Pro názornější ukázkou, jak byly tyto hodnoty během celé doby měření konstantní, jsem vynesl 3 různé parametry do grafu.



Obr.4.7 Charakteristika jmenovitého proudu v průběhu měření

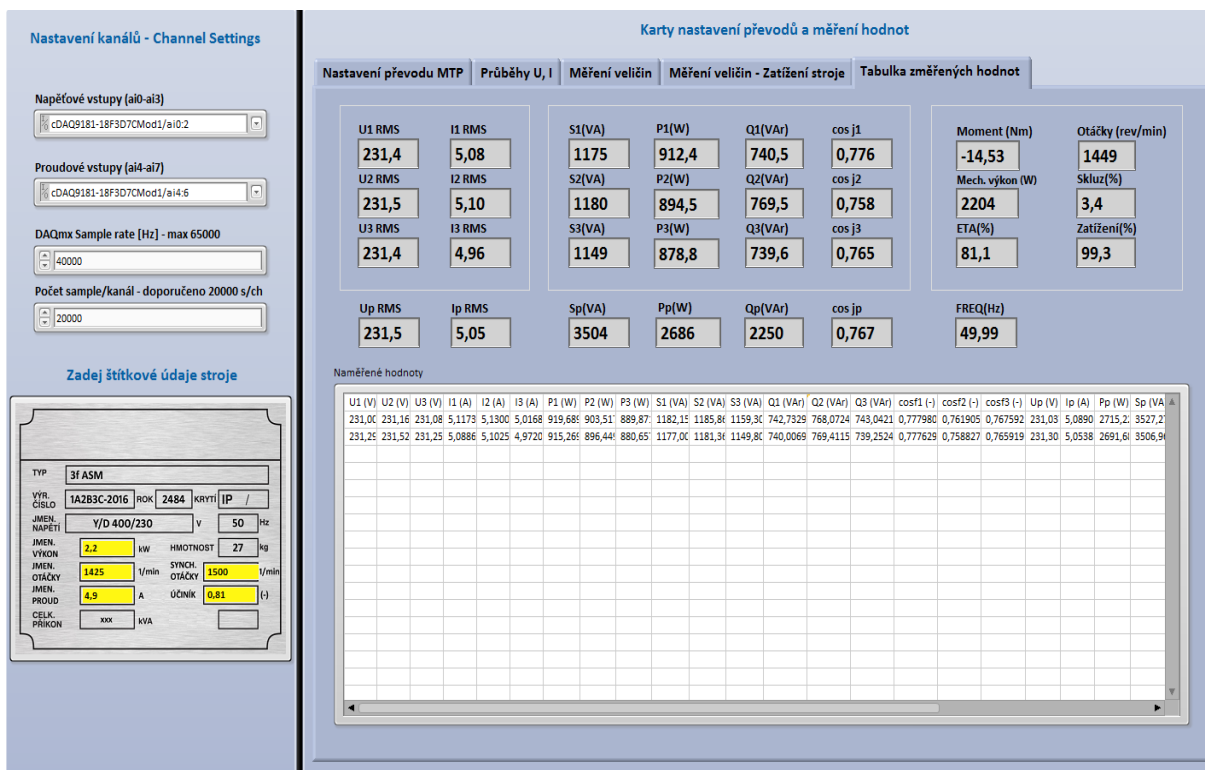


Obr.4.8 Charakteristika jmenovitých otáček v průběhu měření



Obr.4.9 Charakteristika jmenovitého výkonu v průběhu měření

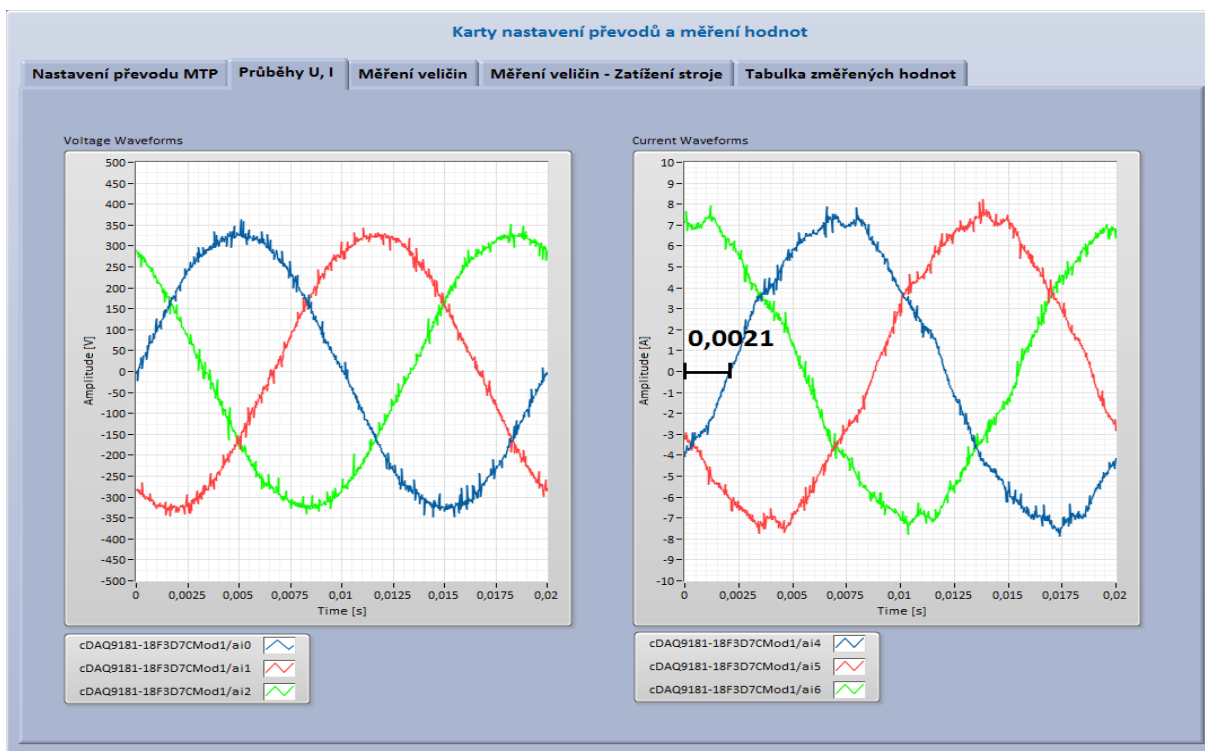
Do této tabulky se během celého měření občas zaznamenávaly hodnoty jmenovitých anebo výstupních hodnot měření. Na levé straně tohoto obrázku můžete vidět štítek daného asynchronního motoru po dosažení jeho jmenovitých hodnot, které jsou vyznačené žlutou barvou.



Obr.4.10 Ukázka tabulky pro zaznamenávání hodnot během měření

Na dalším obrázku jsou znázorněny průběhy napětí a proudu všech tří fází a jejich fázový posuv mezi nimi. Pro názornou ukázkou je na obrázku napěťové charakteristiky jedna fáze zaznamenaná při průchodu nulou. Na vedlejším obrázku je vyznačen rozdíl v (ms), kdy na té samé fázi je proud zpožděn o 0,0025 ms.

4.3.3 Ukázka fázového posuvu a jeho výpočet



Obr.4.11 Obrázek všech fází napětí a proudu s vyznačeným zpožděním proudu v jedné fázi

Názorná ukázka výpočtu $\cos\varphi$

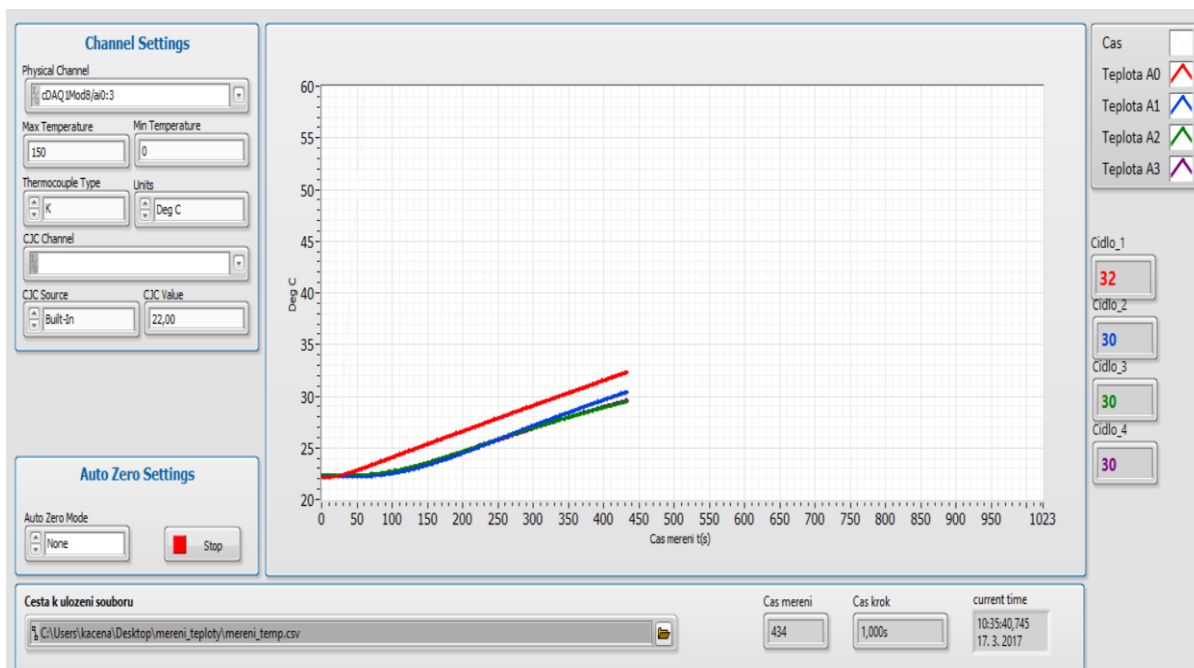
$$1 \text{ ms v } (50\text{Hz síti}) = 18^\circ$$

$$\text{Cos } \varphi = 18.0021 \cdot 10^3 = 37,8^\circ$$

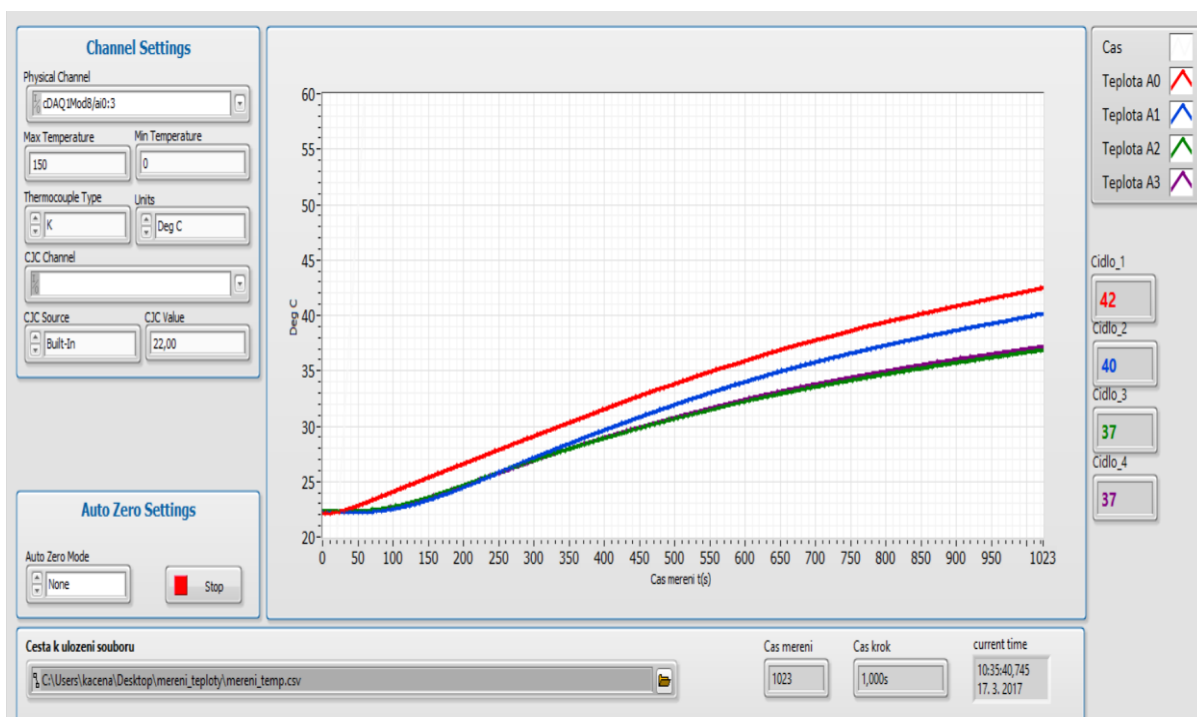
$$\text{Cos } \varphi = \cos(37,8) = 0,7901$$

4.3.4 Grafy oteplovacích charakteristik a konstrukce ustáleného oteplení

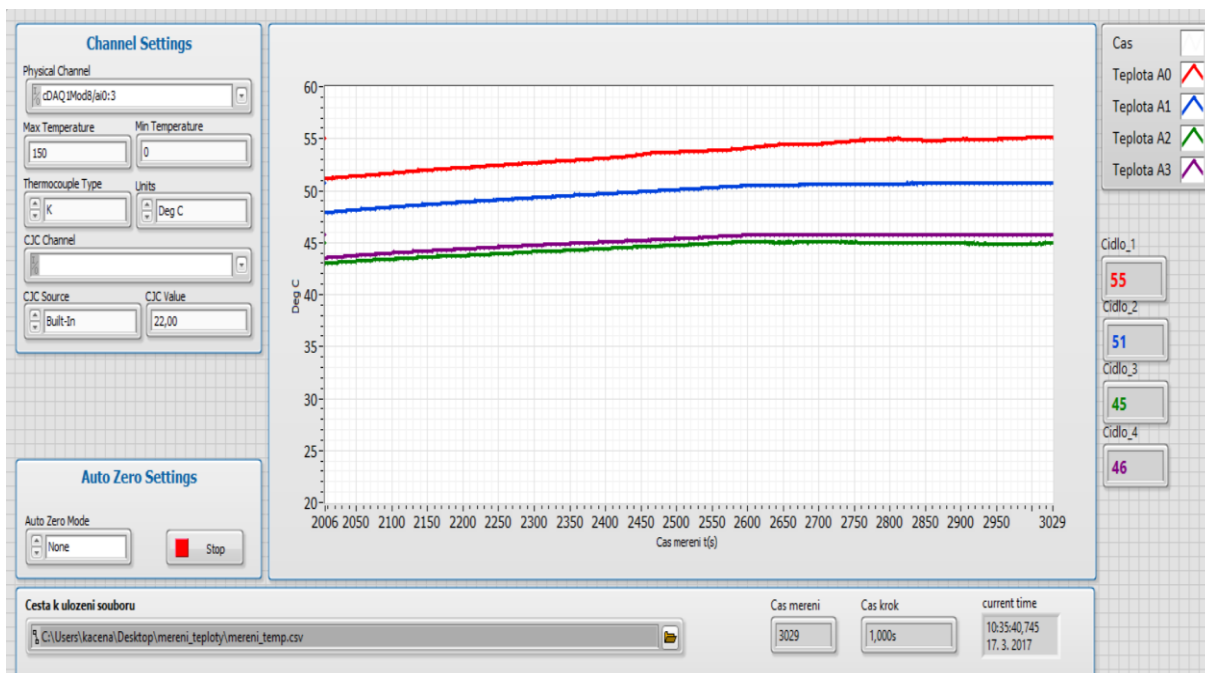
Hlavním bodem tohoto měření je zaznamenat oteplovací charakteristiky konstrukčních částí asynchronního motoru pomocí čtyř tepelných čidel. Toto měření se provádělo při napájení ze sítě s jmenovitými hodnotami po dobu 50 min. Bohužel tyto charakteristiky se posouvají po ose x spolu s časem, proto nejde vidět celou charakteristiku v jednom samostatném grafu. Ale tyto charakteristiky se zaznamenávaly nejen jako grafy, ale také v textovém editoru. Následně bylo tedy možné tyto hodnoty vynést do samostatného grafu, aby bylo možné vidět celkový průběh oteplení.



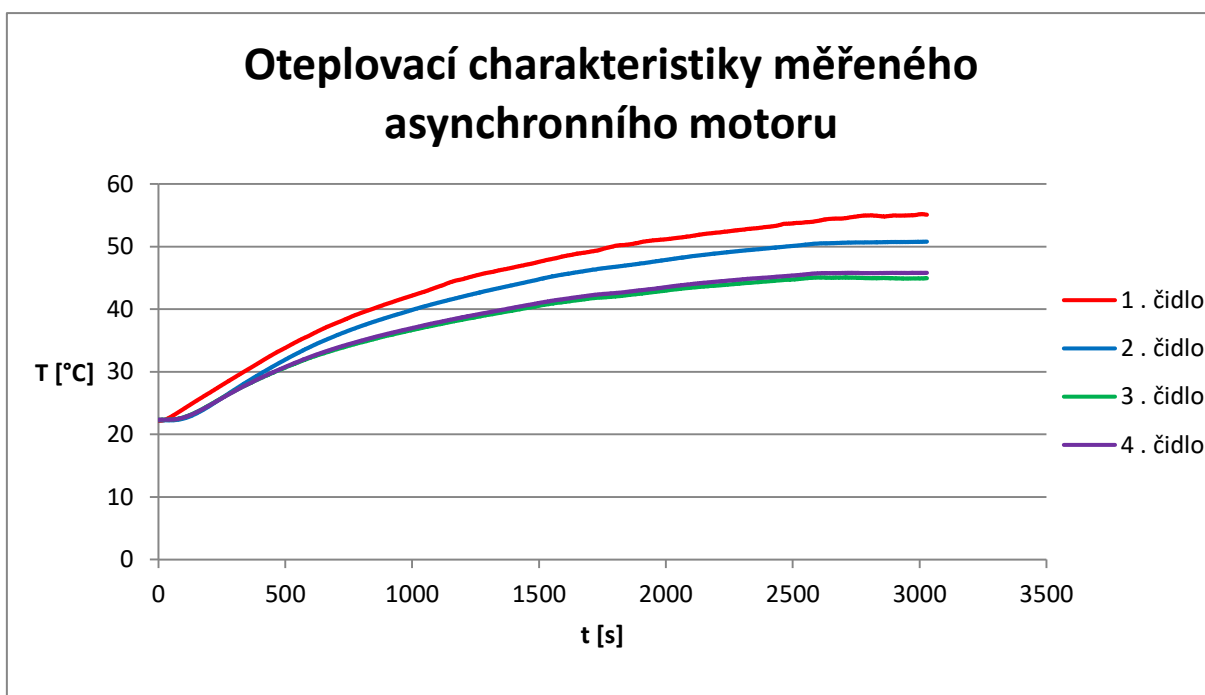
Obr.4.12 Záznam oteplovacích charakteristik pro 434 s (7,23 min)



Obr.4.13 Záznam oteplovacích charakteristik pro 1023 s (17,05 min)



Obr.4.14 Poslední záznam oteplovacích charakteristik před ukončením měření pro 3029 s (50,48 min)

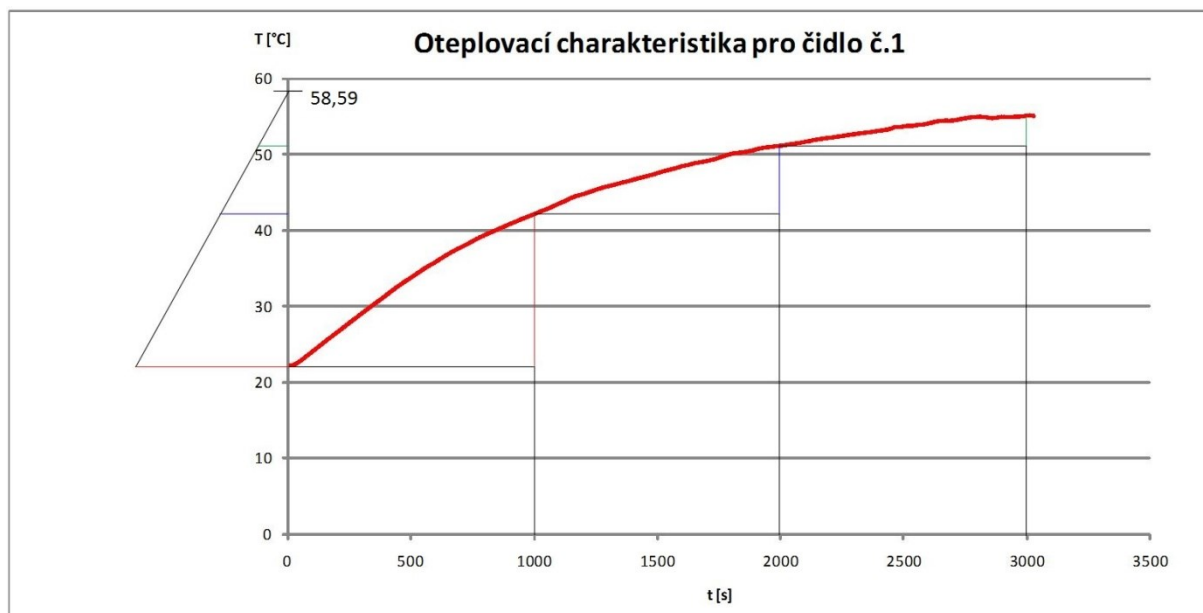


Obr.4.15 Celková oteplovací charakteristika pro celou dobu měření pro čtyři čidla

Tab.4.2 Ukázka tabulky se záznamem hodnot s měření po dobu 10 s

čas [s]	Čidlo č. 1	Čidlo č. 2	Čidlo č. 3	Čidlo č. 4
0	22,182	22,274	22,333	22,334
1	22,201	22,267	22,337	22,335
2	22,193	22,262	22,338	22,34
3	22,205	22,272	22,34	22,348
4	22,2	22,25	22,335	22,354
5	22,219	22,268	22,332	22,347
6	22,187	22,264	22,333	22,347
7	22,195	22,269	22,341	22,362
8	22,18	22,27	22,342	22,346
9	22,197	22,262	22,339	22,345
10	22,202	22,263	22,339	22,341

Po celou dobu měření jsem se však nedostal na ustálené hodnoty oteplení. Tyto hodnoty jsem ale získal pomocí konstrukce pro vynesení ustálené hodnoty z grafu všech 4 křivek. Pro ilustraci jsem vybral pouze graf s ustálenou hodnotou křivky s nejvyšší teplotou.



Obr.4.16 Ukázka konstrukce ustálené hodnoty oteplení pro 1. čidlo

Tab.4.3 Tabulka ustálených hodnot všech čtyř čidel

Číslo čidla	Teploty ustálení
	[°C]
1	58,59
2	53,79
3	48,21
4	49,31

V této tabulce jsou zaznamenány všechny ustálené hodnoty teda maximální teploty, kterých daný zatěžovaný motor dosahoval. Je zde vidět, že nejvyšší teploty dosáhlo čidlo, které bylo umístěno na předním ložiskovém štítu motoru. Toto bylo způsobeno tím, že v této části se nenachází žádné žebrovaní pro přívod vzduchu od ventilátoru umístěného na hřídeli motoru. Je to tedy nejvíce tepelně namáhané místo na celé konstrukční části motoru.

Druhé čidlo bylo umístěno těsně pod svorkovnicí motoru, teda na místě, kde již tuto část ochlazuje proud vzduchu od ventilátoru. Tento rozdíl je již patrný na ustálené teplotě stroje. Zatímco teplota prvního čidla na ložiskovém štítu stroje dosáhla na teplotu 58,59°C, tak teplota na druhém čidle, kde již byl tento stroj chlazen pomocí proudu vzduchu od ventilátoru byla nižší o 4,8°C.

Třetí a čtvrté čidlo bylo umístěno v samotném žebrování stroje. Teda na místě, kde jsou po celou dobu, kdy je motor v provozu, ochlazovány vzduchem proudícím od motoru. Jejich teplota byla v porovnání s druhým čidlem o dalších 5°C nižší. Samotný rozdíl v teplotách mezi třetím a čtvrtým čidlem je již minimální a to z toho důvodu, že se oba tyto čidla nacházela ve velice podobné pozici, rozdíl byl pouze ve vzdálenosti od ventilátoru.

Závěr

V první teoretické části této práce je věnována pozornost celkové konstrukci asynchronního stroje a jeho základním principům. Je zde popisována problematika samotného rozběhu, anebo řízení otáček asynchronního stroje.

V druhé části jsem rozebral celkovou problematiku oteplování asynchronního motoru. Jsou zde popsány všechny možné přestupy tepla. Je zde i vysvětleno, jak je možné graficky docílit ustálenou hodnotu oteplení asynchronního motoru, pokud jsem se na tuto hodnotu během celého měření nedostal.

Ve třetí kapitole jsou popsány možnosti ochrany motorů před účinky překročení jmenovitých teplot, které udává výrobce. Protože s rostoucí teplotou nám klesá životnost izolací, ale hlavně také celková životnost daného stroje.

Čtvrtá kapitola obsahuje celkové výsledky z praktického měření oteplovacích charakteristik asynchronního motoru značky Siemens o výkonu 2,2 kW. Toto měření se provádělo v laboratoři, kde tento motor byl zatížen jmenovitými hodnotami po dobu 50 min. Velikosti jmenovitých hodnot byly kontrolovány tak, aby bylo dosaženo konstantního zatížení motoru po celou dobu měření. Tyto hodnoty se příliš neměnily, jak je vidět na obr. 4.7 až 4.9. pouze občas byla nutná malá korekce způsobená zahříváním motoru. Na obr. 4.11 můžeme vidět posun mezi napětím a proudem v jedné fázi, která je zrovna zaznamenaná při průchodu nulou kvůli lehčímu odečtení hodnoty a vypočtení $\cos\varphi$, které vyšlo 0,7901 a hodnota naměřená v tabulkách ve stejné době měření byla 0,7905. Teploty byly zaznamenávány pomocí čtyř čidel typu K umístěných na různých místech motoru. Čidla byla rozmístěna tak, aby bylo možné sledovat teplotní rozdíly na celém motoru. I když bylo možné umístit na tento motor více čidel, tak z důvodu maximální kapacity vstupů měřicí karty byly použity pouze čtyři. Tento motor má také vyvedené kontakty pro měření teploty vnitřního vinutí čidla PT100, ale bohužel není k dispozici převodník pro přímý převod hodnoty odporu na teplotu. Změny teplot se snímaly v intervalu jedné sekundy po celou dobu měření. Výsledná charakteristika se vykreslovala již jako graf, kterou můžeme vidět na obr. 4.12 pomocí programu labview. Na tomto obrázku je zřejmé, že okamžitě po spuštění měření a samotného motoru teploty postupně začaly stoupat od teploty prostředí, která byla okolo 23°C nahoru. Bohužel nebylo možné v tomto programu zaznamenat celý průběh oteplení na jednom obrázku, protože s rostoucím časem měření se nám posouvala i teplotní osa směrem doprava. Toto jsem poté vyřešil tak, že jsem celkový průběh vynesl z hodnot, které se zaznamenávaly do textového editoru po celou dobu měření a můžete jej vidět na obr. 4.15. Posledním cílem mého měření bylo dostat se u všech čtyř čidel na ustálenou hodnotu, na kterou jsem se za celou dobu měření nedostal. Toto jsem docílil grafickou konstrukcí ustálené hodnoty oteplení, kterou jsem aplikoval na všechny 4 křivky a ukázkou této konstrukce můžete vidět na obr. 4.16.

Seznam použité literatury

- [1] RUSNOK, Stanislav a Pavel SOBOTA. 2013. *Cvičení z elektrických strojů. 1.* Ostrava: VŠB-TOU. ISBN 978-80-248-3288-3
- [2] *Tepelná ochrana točivých motorů* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/energetika/tepelna-ochrana-tocivych-motoru>
- [3] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*: učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. Praha: Statní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [4] *Ochrana motorů* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/energetika/tepelna-ochrana-tocivych-motoru>
- [5] *Trojfázový motor* [online]. In: . [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/11681/content_UC2-4660-obr3.jpg
- [6] *Stator stroje* [online]. In: . [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: http://www.metals-b2b.com/b2b/pics/Stator_Assembly.jpg
- [7] *Řez klecového rotoru* [online]. In: . [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/obrazky/elektronika/motor-16.jpg>
- [8] *Momentová charakteristika asynchronního stroje pro 3 stavy* [online]. In: . [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: http://www.lhotkanet.cz/pub/skola/cvut-fel/!old/14zse/Asynchroni%20motor_soubory/asynchr_soubory/Image15.gif
- [9] *Grafická konstrukce ustálené hodnoty oteplení* [online]. [cit. 2016-12-09]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/ep_komb/ep1-cv7.pdf